УДК 621.791.763

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ТОЧЕЧНОЙ МИКРОСВАРКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СПЛАВА Э110

С.Ф. Гнюсов, А.С. Киселев, М.С. Слободян, Б.Ф. Советченко, М.М. Нехода*, А.В. Струков*, П.М. Юрин*

Томский политехнический университет
* Новосибирский завод химических концентратов
E-mail: s.m.s@ngs.ru

Получена зависимость влияния скорости ввода энергии на прочность и микроструктуру сварных точек. Оценено влияние термической обработки точечных сварных соединений на их физические свойства. Определен интервал скоростей ввода энергии, обеспечивающий высокую прочность сварной точке.

Точечная микросварка находит широкое применение при изготовлении изделий ответственного назначения. К таким изделиям относят дистанционирующие решетки (ДР) тепловыделяющих сборок, работающих в активной зоне атомных реакторов. Особенностью конструкции ДР является то, что она состоит из набора тонкостенных ячеек сложной формы, каждая из которых соединена с соседней двумя сварными точками. В процессе сварки ячеек между собой проявляется множество возмущающих факторов, нарушающих стабильность начальных условий, что отрицательно отражается на качественных показателях каждой последующей сварной точки и предъявляет дополнительные требования к программируемым параметрам режима сварки. В частности, при точечной микросварке наиболее целесообразно использовать одиночные униполярные импульсы тока, скорость нарастания которого не должна превышать критического значения, которое определяется свойствами металла [1–4].

В [2–4] сделаны первые попытки установления связи между энерговложением W при точечной ми-

кросварке тонкостенных деталей из циркониевого сплава Э110, а также из стали 12Х18Н10Т с их структурой, фазовым составом и механическими свойствами. Показано, что увеличение энерговложения (более 10,5 кА·с при сварке деталей из сплава Э110) не приводит к увеличению площади литого ядра и способствует лишь огрублению литой структуры с образованием хрупких метастабильных фаз в сплаве циркония. Это приводит к снижению прочностных свойств соединения. Очевидно, для устранения указанных недостатков необходим комплексный подход, включающий в себя изменение формы импульса тока, энерговложения, скорости ввода энергии и последующей термической обработки.

В данной работе приведены результаты оценки влияния энергетических параметров режима при точечной микросварке тонкостенных деталей из циркониевого сплава Э110 и последующей термической обработки на структуру металла сварной точки и ее механические свойства.

При проведении экспериментов использовали ячейки ДР из циркониевого сплава Э110 толщиной 0,25 мм. Сварку осуществляли на специализированном оборудовании [2].

Амплитудно-временные значения сварочного тока, состоящего из подогревающего $\tau_{под}$ и основного импульсов, приведены на рис. 1, *а*. В качестве варьируемого параметра режима сварки была выбрана «скорость ввода энергии», которая определяется отношением энерговложения основного импульса $W_{осн}$ ко времени основного импульса $\tau_{осн}$ при неизменных параметрах подогревающего импульса. Энерговложение основного импульса, характеризующего тепловую мощность при сварке, определяли по формуле:

$$W_{осн} = \int_{\tau_{под}}^{\tau} I_{св} dt,$$

где τ – длительность импульса сварочного тока; $I_{св}$ – мгновенное значение сварочного тока. Для режимов 1–4 $W_{осн}$ составляет 8 кА·с, для режимов 5–8 – 3 кА·с.

Все сваренные образцы подвергались термической обработке, которая заключалась в отжиге при давлении 10^{-4} Па и температуре 580 °С в течение одного часа с последующим охлаждением с печью.

Прочность исследуемых сварных соединений при растяжении проводили на установке ИНСТРОН-1185 с непрерывной записью кривых напряжение-деформация при скорости нагружения 1,7 мкм/с. Стальная пробка-захват соответствовала внутреннему профилю ячейки. Площадь сечения сварных точек определяли при дискретном сошлифовывании металла на толщину ~100 мкм. С целью сопоставления прочности сварного соединения с прочностью основного металла образцы из исследуемых сплавов испытывали на растяжение согласно ГОСТ 1497-73.

Структурные исследования проводили методами металлографии (оптический микроскоп AXIOVERT 25CA с цифровой камерой и растровый электронный микроскоп РЭМ-100У) и рентгеноструктурного анализа (ДРОН-3 с использованием $Cu_{K\alpha}$ – излучения). Микротвердость металла в зоне сварки (H_{μ}) определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 гс с шагом 50 мкм.

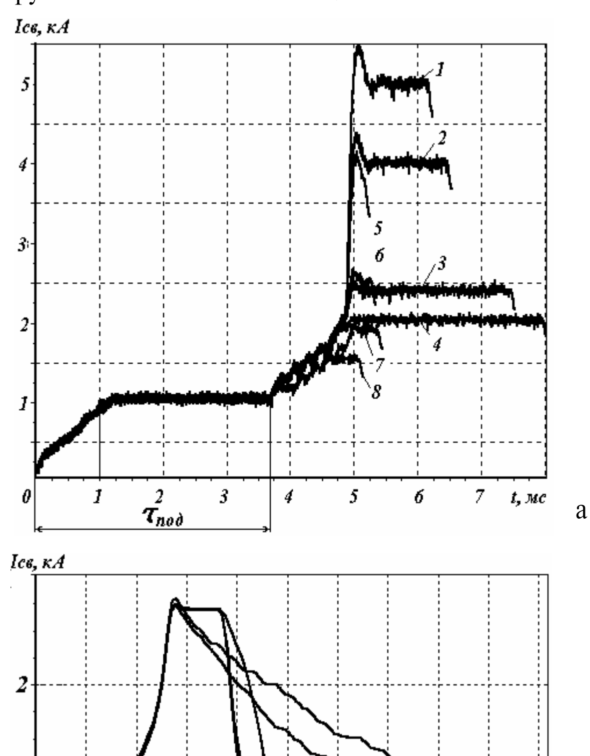


Рис. 1. *Временные диаграммы изменения тока при сварке циркониевого сплава Э110: а) с разными скоростями ввода энергии и б) разными скоростями спада тока в конце сварки*

Анализ поверхности разрушения исследуемых образцов из сплава Э110 свидетельствует о том, что вырыв ядра сварной точки происходит по зоне сплавления с основным объемом металла. Поэтому при расчете прочности соединения площадь разрушения бралась в виде кольца с толщиной стенки 0,25 мм.

На основании проведенных исследований получена зависимость влияния скорости ввода энергии на прочность сварных точек (рис. 2, кривая 1), из которой следует, что при $dW/dt \approx 2$ кА·с/с прочность сварных точек соизмерима с пределом прочности основного материала $\sigma_в$ = 380...440 МПа и хорошо согласуется с литературными данными [5]. Уменьшение скорости ввода энергии ($dW/dt \approx 2$ кА·с/с) приводит к снижению прочности, что связано, по-видимому, с уменьшением зоны физического контакта. Увеличение dW/dt приводит к снижению прочности за счет огрубления литой структуры и

формирования метастабильной мартенситной фазы, рис. 3, *а*.

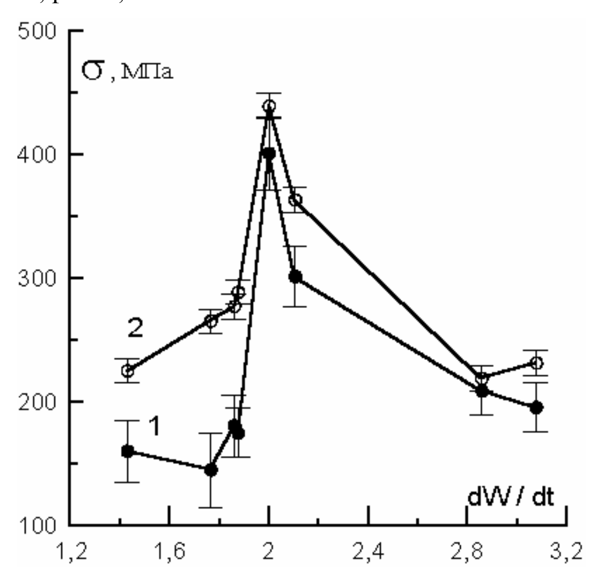


Рис. 2. *Влияние скорости ввода энергии dW/dt на прочность сварных точек: 1) непосредственно после сварки, 2) после сварки и отжига*

Термическая обработка сваренных образцов приводит к увеличению прочности сварных точек (рис. 2, кривая 2) с одновременным уменьшением разброса экспериментальных значений. Это обусловлено распадом метастабильных фаз, грубой литой структуры (рис. 3, *б*) и снятию термических напряжений в литом ядре. Поверхность разрушения образцов, имеющих максимальные значения прочности при растяжении (рис. 2), имеет типично вязкий рельеф (рис. 3, *в*). Для образцов, сваренных со скоростью ввода энергии более 2 кА·с/с, поверхность разрушения наряду с вязкой составляющей имеет участки типично хрупкого излома с многочисленным формированием хрупких вторичных трещин, рис. 3, *г*.

Изменение структуры и фазового состава сварной точки в процессе термической обработки приводит к снижению микротвердости в объеме литого ядра, рис. 4. Микротвердость H_μ металла литого ядра при этом уменьшается на 30...35 % и остается практически неизменной в объеме основного металла.

Полученные данные позволили определить оптимальный интервал скоростей ввода энергии (1,95...2,1 кА·с/с, рис. 2), обеспечивающий максимальную прочность сварной точке.

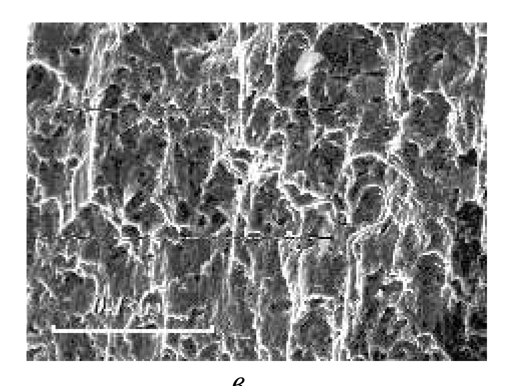
Учитывая положительное влияние термической обработки на свойства сварного соединения (рис. 2, кривая 2) были проведены экспериментальные исследования по оценке влияния скорости спада тока, обеспечивающей возможность частичной термической обработки литого ядра, на прочность сварной точки. Основой импульса сварочного тока являлся режим 3 на рис. 1, *а*, с различным временем спада $I_{св}$ и его формой, рис. 1, *б*. На рис. 5 (кривая 1) представлена зависимость прочности сварных точек от времени спада сварочного тока.



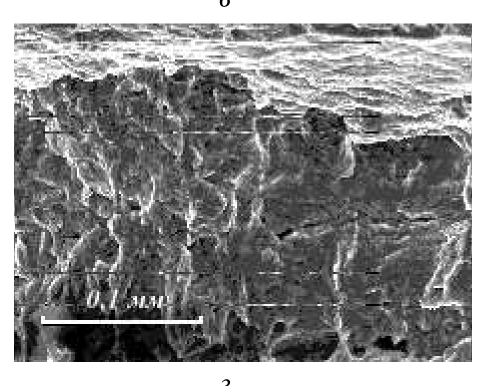
а



б



в



г

Рис. 3. *Микроструктура сварного ядра: а) после сварки и б) после отжига. Сварку производили по режиму 1, рис. 1, а. Микрофрактография поверхности разрушения образцов после испытаний сварных точек на растяжение. Сварку производили: в) по режиму 5, г) по режиму 1, рис. 1, а*

Видно, что увеличение времени спада $I_{св}$ приводит к росту прочности и уменьшению разброса ее значений, обеспечивая стабильность геометрических размеров и механических свойств сварных точек. Это объясняется формированием менее грубой литой структуры в процессе охлаждения, рис. 6, с одновременным снижением термических напряжений [6]. Анализ размера зерна в объеме литого ядра, сваренного по режимам 2 и 8 (рис. 1, *б*), свидетельствует об его уменьшении в 3...4 раза, рис. 6. Однако прочность сварных точек остается ниже прочности основного объема материала. При формировании площадки на уровне 1 кА во время спада сварочного тока с (рис. 1, *б*, кривая 1), приводят к значительному снижению прочности (до 180 МПа, рис. 5, точка 2), что обусловлено сохранением грубой литой структуры с размером зерен 150...200 мкм и повышением объемного содержания метастабильной мартенситной фазы.

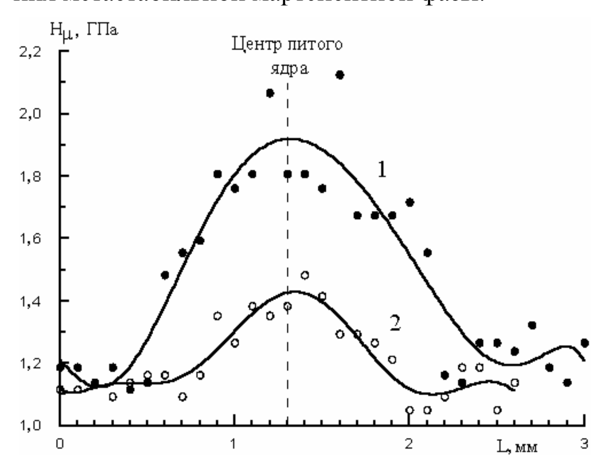


Рис. 4. *Изменение микротвердости в литом ядре: 1) непосредственно после сварки; 2) после отжига*

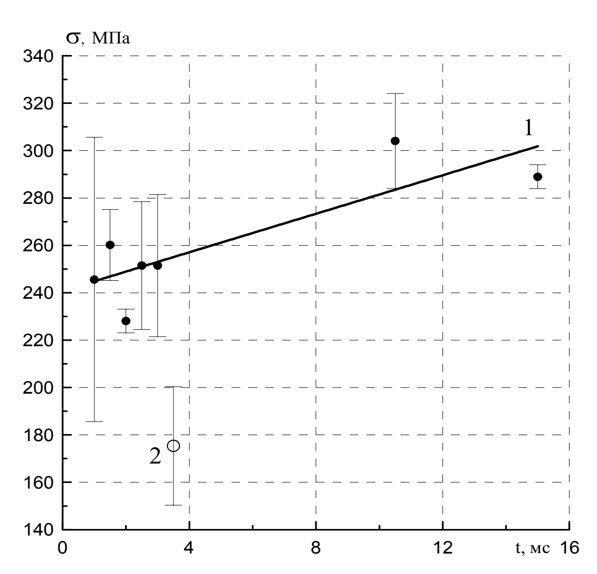
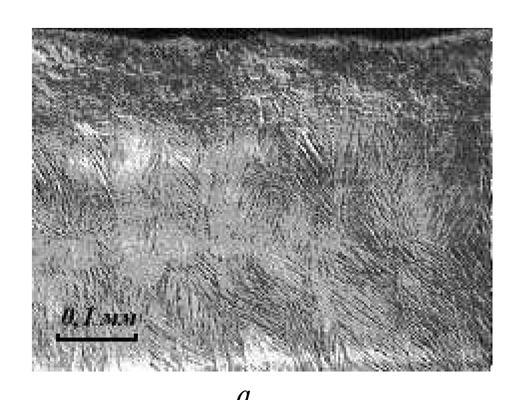
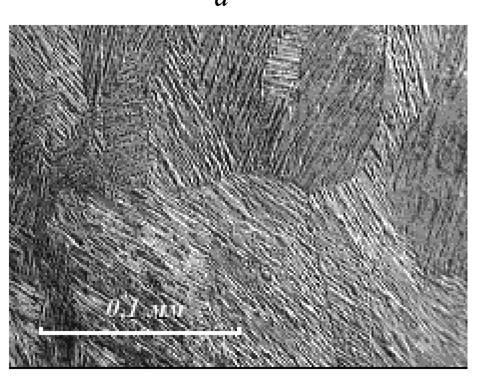


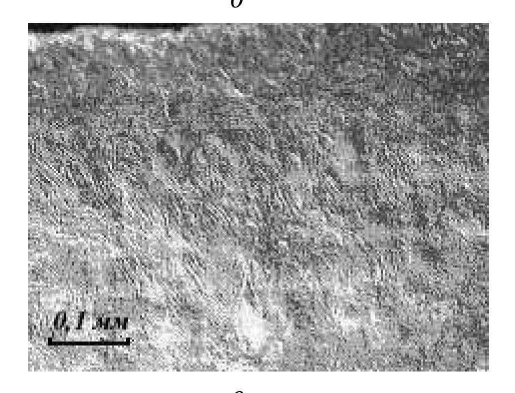
Рис. 5. *Влияние длительности спада сварочного тока на прочность соединения: 1) постоянное уменьшение мгновенного значения сварочного тока; 2) уменьшение сварочного тока с формированием площадки на уровне 1 кА*



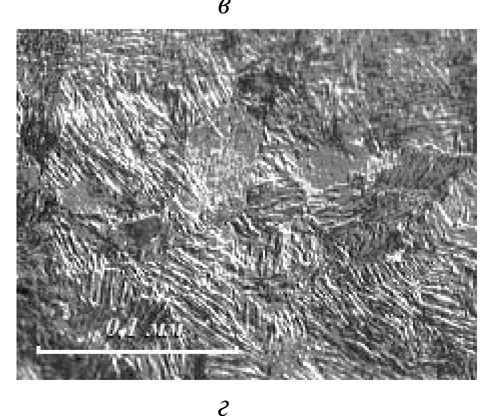
а



б



в



г

Рис. 6. *Микроструктура литого ядра после различных скоростей спада сварочного тока; а, б) сварку производили по режиму 2, рис. 1, б; в, г) сварку производили по режиму 8, рис. 1, б*

Данная структура, характеризующаяся большим размером зерен, формируется в результате увеличения длительности основного импульса тока (рис. 1, *а*, кривая 3). В работах [2–4] показано, что увеличение длительности основного импульса тока и, соответственно, энерговложения, приводит к росту объема литого ядра за счет увеличения глубины проплавления. Это способствует огрублению литой дендритной структуры, в процессе охлаждения которой формируются крупные мартенситные пластины.

Очевидно, что для увеличения объема литого ядра, и, следовательно, зоны физического контакта, с одновременным исключением грубой литой структуры, в процессе охлаждения которой формируются крупные мартенситные пластины, необходимо использовать импульсное изменение сварочного тока, основой которого может служить режим 5 или 6, рис. 1, *а*. Длительность плавного спада сварочного тока после формирования неразъемного соединения и последующая термическая обработка позволит сформировать равнопрочное с основным металлом соединение.

Выводы

1. При контактной точечной микросварке деталей из циркониевого сплава Э110 толщиной 0,25×0,05 мм наиболее высокая прочность соединения обеспечивается при скорости ввода энергии 1,95...2,1 кА·с/с. Численные значения прочности соединения соизмеримы с пределом прочности основного металла ($\sigma_в$ = 380...440 МПа). При большей скорости ввода энергии наблюдается значительное огрубление литой дендритной структуры с формированием при последующем охлаждении крупных мартенситных пластин. В случае меньшей скорости ввода энергии не обеспечивается надлежащий физический контакт свариваемых деталей.
2. Установлено, что для снижения уровня остаточных напряжений и распада метастабильной мартенситной фазы необходим отжиг сваренных образцов при давлении ~10^{-4} Па и температуре 580 °С в течение одного часа. Это обеспечивает уменьшение микротвердости в объеме литого ядра на 30...35 % и увеличение прочности сварного соединения.
3. Показано, что регулированием скорости спада тока после окончания основного импульса удается повысить прочность сварного соединения и уменьшить разброс ее значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Н.М. Микросварка в массовом производстве радиоламп. – Саратов: Приволжское книжное изд-во, 1971. – 176 с.
2. Гнюсов С.Ф., Киселев А.С., Слободян М.С., Советченко Б.Ф. Управление параметрами режима при точечной микросварке // Компьютерные технологии в соединении материалов: Тез. докл. IV Всеросс. научно-технической конф. – Тула, 2003. – С. 111–113.
3. Слободян М.С., Киселев А.С., Гнюсов С.Ф. Влияние энерговложения при точечной микросварке на формирование неразъемного соединения одноименных деталей из стали 12Х18Н10Т и циркониевого сплава Э110 // Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2003: Труды регион. школы-семинара. – Томск, 2003. – С. 60–61.
4. Слободян М.С., Киселев А.С., Гнюсов С.Ф. Влияние скорости ввода энергии на формирование неразъемного соединения одноименных деталей из стали 12Х18Н10Т и циркониевого сплава Э110 // Современные техника и технологии: Труды X юбил. Междунар. научно-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Томск: 2004. – С. 208– 210.
5. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 256 с.
6. Кочергин К.А. Контактная сварка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 240 с.